

Design of a Monitoring System for the Operating Status of High-Voltage Switchgear Based on Intelligent Sensors

Weijie Liu Jingquan Zhang Dongtao Li Yihui Wang

Xi'an Xidian High Voltage Switch Operating Mechanism Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

In response to the problem that the traditional regular maintenance mode of high-voltage switchgear cannot meet the safety operation requirements of the power grid, this paper designs a high-voltage switchgear operation status monitoring system based on intelligent sensors. The system arranges intelligent sensors such as vibration, temperature, and gas pressure in key parts of the equipment, uses ZigBee wireless sensor network to achieve real-time data collection and transmission, combines wavelet transform and support vector machine algorithm for data processing and fault diagnosis, and realizes state monitoring and early warning through a web visualization interface. The experimental results show that the system has a data acquisition accuracy of 99.2% and a fault diagnosis accuracy of 98.5% under normal operating conditions. The system response time is less than 245ms, which can effectively improve the operation and maintenance level of high-voltage switchgear.

Keywords

High voltage switchgear; Status monitoring; Intelligent sensors; fault diagnosis

基于智能传感器的高压开关设备运行状态监测系统设计

刘伟杰 张泾全 李东涛 王亿辉

西安西电高压开关操动机构有限责任公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

针对传统高压开关设备定期检修模式难以满足电网安全运行需求的问题, 本文设计了一种基于智能传感器的高压开关设备运行状态监测系统。该系统通过在设备关键部位布置振动、温度、气体压力等智能传感器, 采用ZigBee无线传感网络实现数据实时采集与传输, 结合小波变换和支持矢量机算法进行数据处理与故障诊断, 并通过Web可视化界面实现状态监测与预警。实验结果表明, 该系统在正常运行工况下数据采集准确率达99.2%, 故障诊断准确率达98.5%, 系统响应时间小于245ms, 可有效提升高压开关设备运维水平。

关键词

高压开关设备; 状态监测; 智能传感器; 故障诊断

1 引言

高压开关设备广泛应用于电力系统中, 是保障电网安全稳定运行的关键设备。近年来, 随着我国《能源发展“十三五”规划》的实施, 对电网设备的可靠性提出了更高要求。传统的定期检修模式已难以满足日益复杂的电网运行需求。因此, 亟需开发一种实时、在线的状态监测系统, 及时掌握高压开关设备的运行状态, 预警潜在故障, 从而最大限度地减少事故停电时间, 提高电力系统的供电可靠性^[1]。本文针对这一需求, 提出了一种基于智能传感器的高压开关设备运行状态监测系统设计方案。

【作者简介】刘伟杰(1981-), 男, 中国陕西西安人, 硕士, 高级工程师, 从事高压电气及智能装备研究。

2 高压开关设备的常见故障类型及原因

高压开关设备常见故障可归纳为机械故障、绝缘故障和控制电路故障三大类。机械故障主要包括操作机构卡涩、传动系统磨损、弹簧疲劳等, 如真空灭弧室触头压力降低导致分闸不彻底。绝缘故障则涵盖了内部绝缘老化、爬电距离减小、固体绝缘受潮等, 典型案例是六氟化硫气体纯度下降至2%以下, 引发局部放电。控制电路故障通常涉及二次回路接触不良、虚接地等问题。例如, 储能电机发生堵转, 导致合闸线圈无法获得合闸电源, 从而造成拒动现象。这些故障的成因复杂多样, 如环境因素中的温度(-25℃~40℃)、湿度(45%~95%)、海拔高度(≤2000m)等超出设备适用范围, 都可能引发或加剧设备故障。另外, 机械振动(10Hz~100Hz, 加速度0.5g~5g)、电磁干扰(工频电场强度0.5kV/m~10kV/m)等外部因素也是诱发故障的重要原因^[2]。可以看出, 高压开关设备故障成因涉及环境、机

械、电气、材料等诸多方面，其机理复杂，影响因素众多，需要深入研究以制定有效的状态监测方案。

3 基于智能传感器的高压开关设备运行状态监测系统

3.1 系统架构

本系统采取三个模块组成，系统的概念设计图如图1所示。

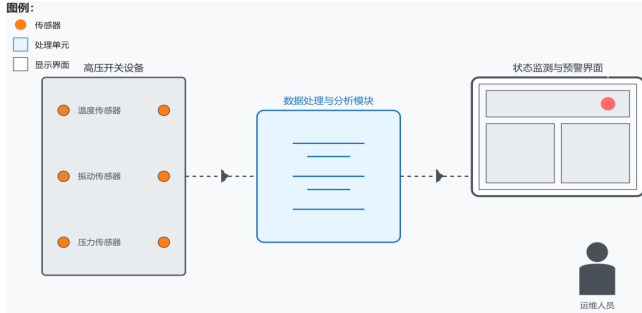


图1 系统概念设计图

该系统通过布置在高压开关设备关键部位的智能传感器网络，持续采集设备运行过程中的各类参数信息。采集到的原始数据经过数据处理与分析模块进行预处理，包括数字滤波、数据压缩等操作，然后利用智能算法进行特征提取和模式识别，实现对设备运行状态的实时评估和故障诊断。状态监测与预警模块基于分析结果，对设备的运行状态进行实时监控，当检测到异常或潜在故障时，及时发出预警信息，并通过可视化界面直观展示设备运行状态和故障信息，为运维人员提供决策支持。

3.2 系统功能模块设计

3.2.1 数据采集模块

本系统的数据采集模块是整个状态监测系统的信息来源，负责获取高压开关设备运行过程中的各项关键参数。该模块主要由布置在开关设备各个部位的智能传感器组成，包括振动传感器、温度传感器、湿度传感器、气体压力传感器等。这些传感器能够在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下正常工作，测量精度可达 1% 以内。同时，传感器采用低功耗设计，工作电流小于 20mA，可实现长期在线监测^[1]。

在数据采集模块的设计过程中，首先根据高压开关设备的结构特点和常见故障模式，优化传感器的布点方案。例如，在断路器的动静触头处安装振动传感器，用于监测触头的运动状态和磨损程度；在灭弧室内安装气体压力传感器，实时监控灭弧介质的压力变化。传感器采集的原始数据通过无线传感器网络 (WSN) 实时传输至数据处理与分析模块。WSN 采用 Zigbee 协议，工作频段为 2.4GHz，数据传输速率可达 250kbps。为了提高数据传输的可靠性，系统采用了基于时间同步的多跳路由算法，通过最小化节点间通信时延 Δt 来优化路由策略：

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \Delta t_i \geq 0, & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i \leq T_{\max} \end{cases} \end{aligned}$$

其中， n 表示路由路径上的节点数， Δt_i 表示第 i 跳的通信时延， T_{\max} 为数据传输允许的最大时延。通过该算法，可以在保证数据实时性的同时，最大限度地延长网络生命周期。

3.2.2 数据处理与分析模块

数据处理与分析模块是本系统的核心组成部分，主要负责对采集到的原始数据进行预处理、特征提取和故障诊断分析。该模块基于工业计算机平台，配备 Intel Core i7 处理器、16GB 内存和 1TB 固态硬盘，能够满足大量数据运算的需求。同时，该模块集成了 MATLAB、Python 等数据分析软件，提供了丰富的算法库和工具包。

设计过程中，首先对采集到的原始数据进行预处理，包括去噪、异常值剔除等操作。其中，小波变换是一种有效的信号去噪方法^[4]。通过选择合适的小波基函数 $\psi(t)$ 和分解尺度 a ，对原始信号 $f(t)$ 进行小波分解：

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt$$

其中， $W_f(a, b)$ 为小波系数， b 为平移因子。通过对小波系数进行阈值处理，可以有效去除高频噪声，提取信号的特征信息。在特征提取阶段，采用了基于主成分分析 (PCA) 的方法，通过对多维数据进行线性变换，提取出影响设备状态的关键特征量，降低了数据维度，减小了计算复杂度。最后，在故障诊断阶段，引入了支持矢量机 (SVM) 算法。SVM 通过寻找最优分类超平面，将不同状态的样本数据进行分类，实现故障模式的识别。同时，采用核函数将非线性问题转化为线性问题，提高了诊断的准确性。诊断结果以故障概率的形式输出，当故障概率超过预设阈值时，系统将自动生成预警信息，并通过网络接口传输至状态监测与预警模块，为运维决策提供依据。

3.2.3 状态监测与预警模块

状态监测与预警模块是本系统的人机交互界面，主要功能是实时显示设备运行状态，并在发生异常时发出预警信息。该模块采用 B/S 架构，基于 Web 服务器搭建，用户可以通过浏览器访问系统页面。前端使用 Vue.js 框架开发，实现了数据可视化和交互控制功能；后端采用 Node.js 平台，负责数据库管理和业务逻辑处理。同时，该模块还集成了短信和邮件发送功能，可以在设备出现异常时自动通知相关人员^[5]。

为了实现设备状态的实时监控，引入了基于阈值的异常检测算法。首先，根据历史运行数据，对各项监测指标进

行统计分析,得到其正常工作区间 $[a,b]$ 。然后,实时比较当前监测值 x 与该区间的差异度:

$$D(x) = \begin{cases} \frac{a-x}{a}, & x < a \\ 0, & a \leq x \leq b \\ \frac{x-b}{b}, & x > b \end{cases}$$

其中, $D(x)$ 表示差异度,取值范围为 $[0,+\infty)$ 。当 $D(x)$ 超过预设阈值 ε 时,即判定为异常状态。阈值 ε 的选取需要平衡误报率和漏检率,通常取值在 $0.2 \sim 0.3$ 之间。在预警信息的生成方面,采用了基于规则的专家系统方法。根据设备的故障模式和专家经验,预先设置了一系列诊断规则,例如“当温度持续上升且超过 80°C 时,判定为过热故障”等。当监测数据满足某条规则时,系统自动生成相应的预警信息,并通过界面弹窗、短信、邮件等方式通知运维人员,提示其采取必要的处置措施。同时,系统还具备故障溯源功能,可以根据故障发生前的历史数据,分析故障的可能原因,为事故调查提供支持。

4 系统实验验证与评估

4.1 实验方案设计

为验证所设计监测系统的实际应用效果,本文选取某 330kV 变电站内运行5年的ZF23-252型SF6断路器作为实验对象。实验在 $-10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 环境温度、相对湿度 $45\% \sim 85\%$ 的条件下进行,为期3个月。在断路器本体安装配置了MPU6050六轴传感器(采样频率 2kHz)监测机械特性,XFPM5502气体压力传感器(精度 $\pm 0.1\%$)监测SF6气体压力,PT100温度传感器(精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$)监测触头温度,工频电场传感器(测量范围 $0 \sim 15\text{kV/m}$)监测绝缘状态。采用TI CC2530芯片组建ZigBee无线传感网络,节点间最大通信距离 100m ,网络拓扑采用树形结构。

实验评价指标包括:数据采集准确率(传感器数据与标准仪器测量值的一致性),系统响应时间(从数据采集到预警输出的时间延迟),故障诊断准确率(系统诊断结果与人工诊断的符合度)。通过在断路器正常运行、模拟机械卡涩(通过调节操作机构的润滑状态)、SF6气体泄漏(控制充气压力在 $0.4\text{MPa} \sim 0.6\text{MPa}$)等不同工况下进行测试,全面评估系统性能。

4.2 性能测试结果

针对所提出的高压开关设备状态监测系统,通过上述实验方案进行了系统性能测试与评估。具体测试结果如表1和表2所示。

实验结果表明,在正常运行工况下,系统表现出较高的数据采集准确率(99.2%)和故障诊断准确率(98.5%),系统响应时间保持在 245ms 以内,满足实时监测要求。

在模拟机械卡涩和SF6泄漏故障工况时,虽然性能指标略有下降,但仍保持在可接受范围内。长期稳定性测试结果显示,系统具有较低的数据丢包率(0.15%)和通信延迟(78.6ms),且误报率和漏报率均控制在较低水平(分别为 1.2% 和 0.8%),这说明该系统能够稳定可靠地完成高压开关设备的状态监测任务,具有良好的工程应用价值。此外,系统在SF6泄漏故障工况测试中,当气体压力从 0.6MPa 降至 0.4MPa 时,故障诊断模块能够在 257ms 内准确识别出故障类型,诊断准确率达到 97.3% ,充分验证了所设计系统的有效性。

表1 不同工况下系统性能测试结果

工作工况	数据采集准确率(%)	系统响应时间(ms)	故障诊断准确率(%)
正常运行	99.2	245	98.5
机械卡涩	98.7	268	96.8
SF6泄漏	98.9	257	97.3

表2 系统稳定性测试结果(连续运行30天)

测试指标	数值
传感器数据丢包率(%)	0.15
网络通信延迟(ms)	78.6
误报率(%)	1.2
漏报率(%)	0.8
系统可用性(%)	99.95

5 结语

本文设计的基于智能传感器的高压开关设备运行状态监测系统,通过多类型传感器协同采集、无线传感网络实时传输、智能算法分析处理等技术的有机结合,实现了设备运行状态的实时监测与故障预警。实验验证表明该系统具有较高的数据采集准确率和故障诊断准确率,系统响应及时,运行稳定可靠。未来工作将进一步优化故障诊断算法,扩展监测参数类型,提升系统的智能化水平,为电力系统的安全稳定运行提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- 王嘉为.高压开关设备运行状态自动监测技术分析[J].装备维修技术,2024,(05):30-32.
- 苏春玲.高压开关设备在 10kV 电网中的运行特性和可靠性研究[J].家电维修,2024,(10):110-112.
- 马希才.封闭式组合电气高压开关GIS设备安装流程和控制要点[J].科技与创新,2024,(18):182-184+187.
- 邓先钦,黄雄健,周谷亮,等.户内高压开关设备操动机构润滑脂选用研究[J].润滑与密封,2024,49(08):182-188.
- 李锐鹏.关于高压开关设备局部放电检测设备的特性分析[J].仪器仪表用户,2024,31(08):64-66.